

桑小头木虱内生殖系统的形态特征及其在不同发育时期的变化趋势研究

韦红显¹, 耿涛², 武华周², 娄德钊², 吴春标¹, 谢云会³, 卢芙萍^{2*}, 王树昌^{2*}

1. 海南大学, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所/农业农村部热带作物病虫害综合治理重点实验室/海南省热带农业有害生物监测与控制重点实验室, 海南海口 571101; 3. 贵州大学, 贵州贵阳 550025

摘要: 桑小头木虱是近年来热带亚热带地区为害桑树的最重要害虫, 个体小, 繁殖快, 世代重叠, 导致桑叶产量损失超 40%, 苗期受害甚至绝收, 防治难度大。为准确预测和高效防治桑小头木虱, 提高桑叶产量和质量, 本研究对桑小头木虱不同发育时期雌雄成虫内生殖系统进行解剖和显微观察, 初步明确其雌雄成虫内生殖系统形态特征及其在交配前后的变化趋势。结果表明, 桑小头木虱雌性内生殖系统组成除侧输卵管有 2 对外, 与非洲柑橘木虱相似; 雄性内生殖系统组成则与亚洲柑橘木虱高度相似。与交配前期相比, 雌成虫受精囊的长度在交配期和交配后期分别达交配前期的约 1.63 倍和 1.85 倍, 宽度约增加至交配前期的 1.74 倍和 1.84 倍, 各时期存在显著差异 ($P<0.05$), 卵粒的长度和宽度均快速增加, 至交配期增加近 2 倍 ($P<0.05$), 同时, 交配期卵粒内部可见数个体积较大的囊泡, 至交配后期消失, 其应为滋养细胞, 为卵母细胞提供营养。与交配前期相比, 雄成虫精巢在交配期增至最大, 交配后期缩至最小, 3 个时期存在显著差异 ($P<0.05$), 而在交配期和交配后期, 贮精囊的长度和宽度均显著增加, 增至 2 倍左右 ($P<0.05$)。本研究对准确判断并确定桑小头木虱防治适期、生殖相关基因的筛选和新型基因靶向药剂的研发应用, 以及高效监测与防控措施的制定具有现实意义。

关键词: 桑小头木虱; 内生殖系统; 形态特征; 变化趋势

中图分类号: S888.723 文献标识码: A

Morphological Characteristics and the Change Trends of the Internal Reproductive System of *Paurocephala sauteri* Adults in Different Developmental Stage

WEI Hongxian¹, GENG Tao², WU Huazhou², LOU Dezhaohao², WU Chunbiao¹, XIE Yunhui³, LU Fuping^{2*}, WANG Shuchang^{2*}

1. Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences / Key Laboratory of Integrated Pest Management on Tropical Crops, Ministry of Agriculture & Rural Affairs / Hainan Provincial Key Laboratory of Monitoring and Control of Tropical Agricultural and Forest Invasive Alien Pests, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract: *Paurocephala sauteri*, characterized by small individuals, rapid reproduction and overlapped generations, is the most damaging pest of mulberry trees in tropical and subtropical areas. It happens in seedling period, leading to yield loss over 40%, or even out of harvest, and is very difficult to control. In order to accurately predict and efficiently control the pest, and to improve the yield and quality of mulberry leaves, the internal reproductive system of the male and female adults of the pest in different developmental periods was dissected and observed to clarify the morphological

收稿日期 2022-08-29; 修回日期 2022-11-19

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 320RC689); 现代农业产业技术体系专项资金项目 (No. CARS-18-SYZ17); 海南省重点研发计划项目 (No. ZDYF2020219)。

作者简介 韦红显 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农业昆虫与害虫防治。*通信作者 (Corresponding author): 卢芙萍 (LU Fuping), E-mail: fuping_36@163.com; 王树昌 (WANG Shuchang), E-mail: wangshuchang2001@163.com。

characteristics and changes of the internal reproductive system of male and female adults of the pest before and after mating. Except for 2 pairs of lateral oviducts the composition of the internal reproductive system of the female adults is similar to *Trioza erytreae* (Del guercio), and male adults is highly similar to *Diaphorina citri* (Kuwayama). Compared with the pre-mating period, the length of spermatheca in mating and post-mating periods reached nearly 1.63 times and 1.85 times, and the width increased by about 1.74 times and 1.84 times respectively, with significant differences in each period ($P<0.05$), the length and width of eggs increased rapidly, to mating period increased by nearly 2 times ($P<0.05$). At the same time, several large vesicles appeared inside the egg in mating period and disappeared in post-mating period, them should be trophoblasts, providing nutrition for oocytes. Compared with the pre-mating period, the testes of the male increased to the maximum in the mating period and shrank to the minimum in the post-mating period. There were significant differences in the three periods ($P<0.05$), while the length and width of the seminal vesicle both significantly increased to about twice ($P<0.05$) in mating and post-mating periods. This study has practical significance to precisely judge and determine the appropriate period of prevention and control, to clone reproductive-related genes, to develop new gene targeting agents, and to formulate efficient prevention and control measures of *P. sauteri*.

Keywords: *Paurocephala sauteri*; internal reproductive system; morphological characteristics; change trends

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.05.017

桑小头木虱 (*Paurocephala sauteri* Enderlein) 是近年来新入侵我国大陆地区的重要桑树害虫^[1], 主要分布于我国包括台湾南投地区在内的热带亚热带地区^[2-5], 国外主要记录于菲律宾、印度、印度尼西亚、马来西亚和泰国^[2, 6-8]。该虫主要以若虫聚集在嫩叶和顶芽背面叶脉处吸食为害, 雌雄成虫则可于叶片正反两面取食和交配繁殖, 若虫和雌虫可分泌蜡质, 雄虫可分泌蜜露, 种群密度高时, 大量的蜡质和蜜露排泄会掉落堆积覆盖在下方叶片并诱发煤烟病, 降低桑叶的光合作用, 严重影响桑叶的产量和质量。海南适宜的温度和高湿的气候环境非常适宜桑小头木虱的生长发育与繁殖, 发生一代的时间仅约 18 d, 年发生代数超过 20 代, 且可随着桑树的发育终年繁殖^[1]。近年来该虫已成为我国热带亚热带地区, 尤其是海南省桑园发生为害最严重的害虫, 海南省琼中黎族苗族自治县、临高县、万宁市、儋州市等重要桑树种植区桑园受害率高达 100%, 产量损失高达 40%以上^[1], 严重影响当前桑资源的多元化利用, 给桑蚕产业带来极大挑战。

目前桑园桑小头木虱大发生时, 主要以化学药剂防治若虫和色板诱杀成虫为主^[1], 海南桑蚕产业主要以养蚕为主, 3—11 月为主要养蚕期, 且桑园交替伐条不间断养蚕, 尤其因家蚕对药剂非常敏感, 使桑小头木虱的药剂防治很不彻底, 交替伐条养蚕和交替防治使桑小头木虱可在防治与不防治桑园之间来回迁移为害, 且在下一个防治周期时已经在新迁移桑园繁殖 2 代以上, 也是其种群数量长期居高不下的主要原因, 虽然也有

六斑月瓢虫和小十三星瓢虫等天敌自然捕食, 但在桑树种植区的自然控制作用非常有限。桑小头木虱已成为热区桑蚕生产上最难防治的害虫。

明确昆虫的生殖系统结构及其变化, 对有效判断并确定防治适期^[9-10]、高效色板筛选以诱集更多产卵前期和交配前期的雌雄成虫^[9-11], 诱导雌雄成虫滞育^[12-14]、性信息素研究和利用^[15]、生殖相关基因的筛选和新型基因靶向药剂的研发应用^[16-17], 以及通过延迟交配降低生殖力从而降低种群数量^[18], 有效制定防控措施具有现实意义。因此, 本研究对桑小头木虱不同发育时期雌雄成虫内生生殖系统进行解剖和显微观察, 初步明确其雌雄成虫内生生殖系统结构以及交配前后生殖系统的形态变化趋势, 为准确监测和高效防治桑小头木虱, 提高桑叶产量和质量奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 材 料

1.1.1 供试昆虫 桑小头木虱若虫及成虫均采自海南省琼中黎族苗族自治县海南中丝蚕桑有限公司基地 (109°85'60.06"E, 19°04'08.77"N) 的桑树上, 在室内(27±1)°C, 相对湿度 70%±5%, L:D=12:12, 以桑苗笼罩饲养。

1.1.2 供试寄主植物 饲养供试昆虫所用桑苗为本实验室自行扦插的 45 日龄以上的盆装桑苗, 桑苗品种为抗青 283×抗青 10。

1.1.3 仪器 SZ650 连续变倍体视显微镜: 重庆奥特光学仪器有限责任公司; 数码生物显微镜 AT3116: 深圳市爱科学教育科学有限公司。

1.2 方法

1.2.1 桑小头木虱雌雄成虫内生生殖系统解剖与观察 取不同发育时期的桑小头木虱雌雄成虫，置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱，20 min 后取出，在 SZ650 连续变倍体视显微镜下确认雌雄个体。载玻片中央滴一滴清水，将成虫腹面朝上置于中间，用一根零号针水平压在腹部与胸部连接处，另一根零号针将脂肪体和内生生殖系统轻轻拨出，去除多余脂肪和组织，置于数码生物显微镜 AT3116 下观察拍照，底光源照片为黑白相，侧光源照片为实际颜色，生殖系统无需染色处理。

1.2.2 桑小头木虱成虫内生生殖系统结构变化观察 参照卢芙蓉等^[1]的方法。收集 5 龄若虫，于培养皿内离体叶片饲养，饲养至羽化后雌雄配对，分别取交配前期（羽化后 36 h）、交配期（交配约 9 h）和交配后（产卵期）的雌、雄成虫各 30 头进行解剖。

观察记录并测量每个时期雄虫精巢及贮精囊，雌虫受精囊和卵粒的大小及形态变化，以观察和统计桑小头木虱雌雄成虫内生生殖系统在不同时期的主要变化趋势。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 25 软件分别比较分析不同发育时期桑小头木虱雌雄成虫生殖系统主要结构的大小差异。采用邓肯氏新复极差检验法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 桑小头木虱成虫内生生殖系统结构的解剖特征

2.1.1 雌成虫 桑小头木虱雌成虫内生生殖系统的解剖结构见图 1，其中各部分结构命名参考 1967 年 BLOWERS 等^[19]的非洲柑橘木虱的雌虫内生生殖系统。由图 1 可见，雌虫内生生殖系统由 1 对卵巢、4 根侧输卵管、1 根中输卵管、1 个受精囊、1 个黏腺、1 个交尾囊和 1 个附腺组成。卵巢上的卵粒通过卵巢小管附着在侧输卵管上，4 根侧输卵管末端分别位于中输卵管的不同位置，中输卵管末端与受精囊连接，交尾腺位于受精囊和中输卵管连接的位置，附腺位于受精囊另一侧，黏腺与受精囊在同一侧，通过黏管连接在内生殖系统的基部。

2.1.2 雄成虫 桑小头木虱雄成虫内生生殖系统的解剖结构见图 2，其中各结构参考肖培彬等^[9]的亚洲柑橘木虱雄虫内生生殖系统。由图 2 可见，雄成

虫内生生殖系统由 1 对精巢、1 对输精管、1 对附腺、1 个贮精囊、1 个精泵和 1 个射精管组成。贮精囊位于整个内生生殖系统的中间，2 个附腺和 2 个精巢分别位于贮精囊左右，形成对称体。精巢呈纺锤形，中间大，两端小，通过输精管与贮精囊连接，贮精囊球形，中间有 1 凹痕，贮精囊底部与射精管连接至外生殖器，精泵处在射精管中部，1 对附腺始终为半透明状。

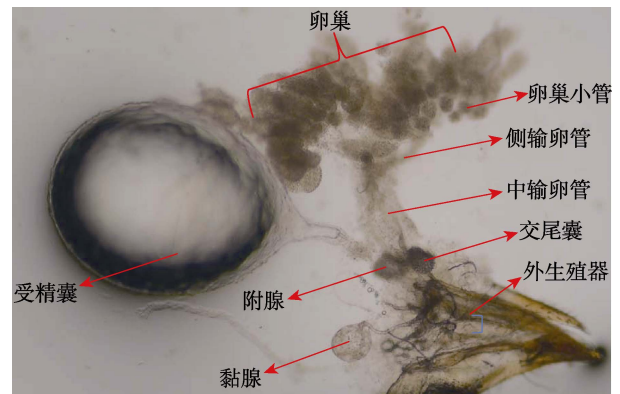


图 1 桑小头木虱雌成虫内生生殖系统特征

Fig. 1 Internal reproductive system of adult female *P. sauteri*

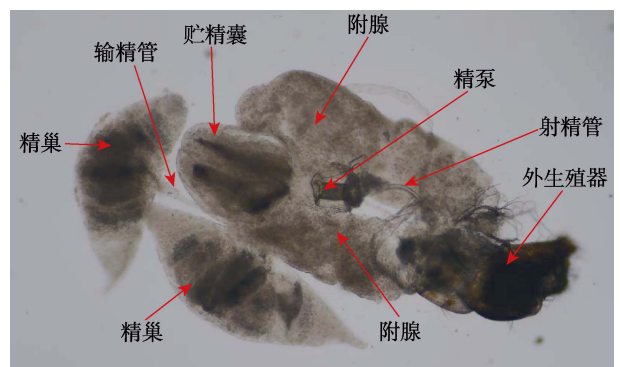


图 2 桑小头木虱雄成虫内生生殖系统形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of internal reproductive system of adult male *P. sauteri*

2.2 桑小头木虱成虫内生生殖系统构造的形态变化趋势

2.2.1 雌成虫 交配前期受精囊不饱满，半透明状，白色，交配期和交配后期受精囊内有明显白色精包。

与交配前期相比，受精囊的长度和宽度均逐渐增加，受精囊长度由交配前期的 $(897.57 \pm 48.23)\mu\text{m}$ ，增加至交配期的 $(1463.54 \pm 30.72)\mu\text{m}$ 和交配后期的 $(1662.11 \pm 55.36)\mu\text{m}$ ，分别为交配前期的 1.63 倍和 1.85 倍；宽度由交配前期的 $(505.58 \pm$

23.42) μm , 增加至交配期的(878.13 \pm 25.30) μm 和交配后期的(932.29 \pm 56.33) μm , 分别为交配前期的 1.74 倍和 1.84 倍, 前、中和后期均存在显著差异 (表 1, 图 3)。

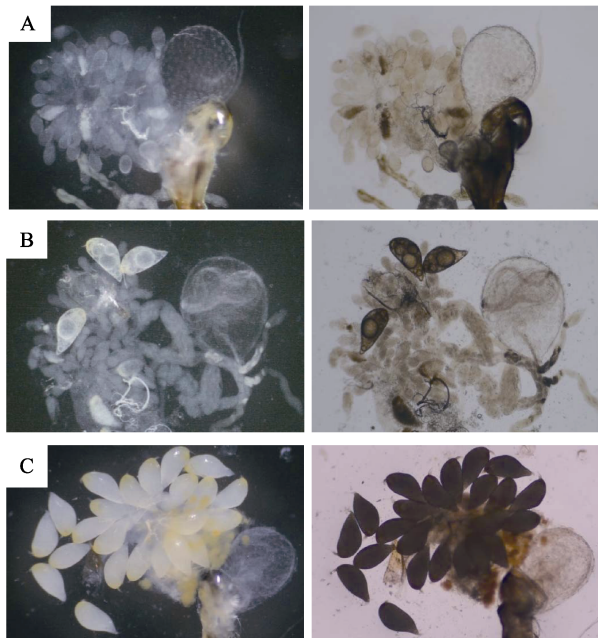
与交配前期相比, 交配期和交配后期卵粒显著变长、变宽 (表 1, 图 3), 长度和宽度均快速增加至交配前期的近 2 倍。交配前期诸多卵粒通过卵巢小管连接侧输卵管上, 前期卵粒为白色; 交配期卵粒内部可见数个体积较大的囊泡, 卵粒底部为淡黄色; 交配后期卵粒内部较大囊泡消失,

表 1 桑小头木虱不同发育时期雌成虫受精囊和卵变化
Tab. 1 Size change of spermatheca and egg of female adult *P. sauteri* in different developmental periods μm

时期 Period	受精囊 Spermatheca		卵 Egg	
	长度 Length	宽度 Width	长度 Length	宽度 Width
交配前期	897.57 \pm 48.23 ^a	505.58 \pm 23.42 ^c	216.95 \pm 26.64 ^a	112.09 \pm 17.41 ^b
交配期	1463.54 \pm 30.72 ^b	878.13 \pm 25.30 ^b	562.50 \pm 21.66 ^b	283.59 \pm 22.12 ^a
交配后期	1662.11 \pm 55.36 ^a	932.29 \pm 56.33 ^a	617.68 \pm 22.61 ^b	281.47 \pm 20.35 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).



A: 交配前期; B: 交配期; C: 交配后期。左图为数码生物显微镜 AT3116 的侧光源照片, 右图为底光源照片。

A: Pre-mating period; B: Mating period; C: Post-mating period. Side light source photos of digital biomicroscopy AT3116 are on the left and bottom light source photos are on the right.

图 3 桑小头木虱雌成虫内生殖系统不同时期形态特征
Fig. 3 Morphological characteristics of internal reproductive system of female adult *P. sauteri* in different periods

卵粒底部变为明显的黄色。

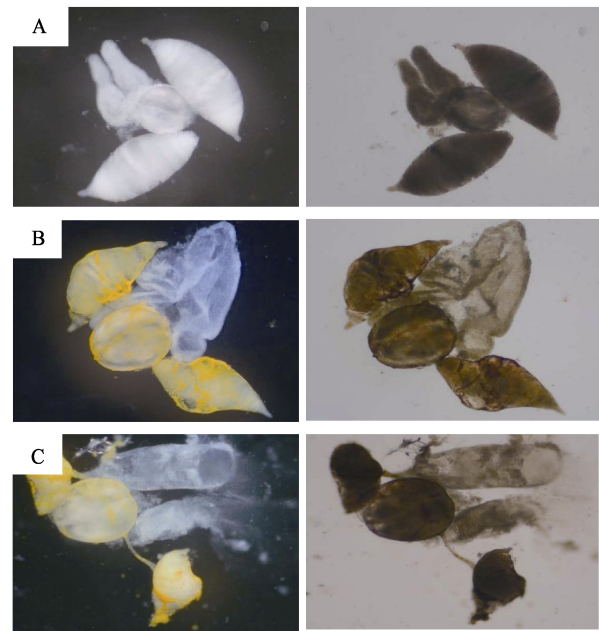
2.2.2 雄成虫 雄成虫精巢在不同时期变化较大, 尤其是长度, 在交配前期为(1200.89 \pm 21.02) μm , 至交配期达最大, 为(1342.19 \pm 37.16) μm , 而在交配后期逐渐变短, 为(1009.94 \pm 64.15) μm , 前、中、后期存在显著差异, 宽度则在交配期达最大, 为(546.88 \pm 28.53) μm , 显著宽于交配前期的(497.40 \pm 13.04) μm 和交配后期的(487.98 \pm 24.00) μm (表 2)。交配前期精巢和输精管为白色, 交配期和交配后期精巢和输精管颜色变黄 (图 4)。

表 2 桑小头木虱不同发育时期雄成虫精巢和贮精囊变化
Tab. 2 Size change of testis and seminal vesicle of male adult *P. sauteri* in different developmental periods μm

时期 Period	精巢 Testis		贮精囊 Seminal vesicle	
	长度 Length	宽度 Width	长度 Length	宽度 Width
交配前期	1200.89 \pm 21.02 ^b	497.40 \pm 13.04 ^b	343.75 \pm 31.25 ^c	329.69 \pm 28.95 ^b
交配期	1342.19 \pm 37.16 ^a	546.88 \pm 28.53 ^a	809.38 \pm 37.30 ^a	635.42 \pm 36.53 ^a
交配后期	1009.94 \pm 64.15 ^c	487.98 \pm 24.00 ^b	760.94 \pm 27.61 ^b	623.96 \pm 49.93 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).



A: 交配前期; B: 交配期; C: 交配后期。左图为数码生物显微镜 AT3116 的侧光源照片, 右图为底光源照片。

A: Pre-mating period; B: Mating period; C: Post-mating period. Side light source photos of digital biomicroscopy AT3116 are on the left and bottom light source photos are on the right.

图 4 桑小头木虱雄成虫内生殖系统不同时期形态特征
Fig. 4 Morphological characteristics of internal reproductive system of male adult *P. sauteri* in the different periods

贮精囊的大小在不同时期变化较大，与交配前期相比，交配期的长度约为交配前期的 2.35 倍，宽度约为 1.93 倍，交配后期虽然稍有变小，但其长度仍约为交配前期的 2.21 倍，宽度约为 1.89 倍，显著大于交配前期（表 2）。且其颜色也发生较大变化，由交配前期的白色，变为交配期和交配后期的黄色（图 4）。

附腺在交配期和交配后期明显大于交配前期（图 4）。

3 讨论

桑小头木虱雄性内生生殖系统的形态特征与亚洲柑橘木虱极为相似，但雌成虫内生生殖系统却与非洲柑橘木虱更加相似^[9, 19]。桑小头木虱雄成虫的 2 个精巢都是纺锤状，中间大，两边小，贮精囊为球形，与亚洲柑橘木虱非常相似^[9]。而不同之处仅体现在颜色上，亚洲柑橘木虱的精巢、输精管和贮精囊的颜色交配前期为黄色，交配期和交配后期颜色加深变为橙色，而桑小头木虱的精巢、输精管和贮精囊在交配前期为白色，交配期和交配后期为黄色。然而，在雌性内生生殖系统组成和形态上，桑小头木虱却与非洲柑橘木虱更为相似，除桑小头木虱有 2 对侧输卵管，而非洲柑橘木虱为 1 对外，卵巢、卵巢小管、中输卵管、受精囊、黏腺、附腺和交尾囊的数量相同，形态均相似，尤其在桑小头木虱早期的受精囊膜上出现的多个白色的点。而亚洲柑橘木虱和桑小头木虱雌性内生生殖系统之间却存在较多差异：（1）亚洲柑橘木虱为 1 对侧输卵管，而桑小头木虱的侧输卵管为 2 对；（2）亚洲柑橘木虱有 2 个附腺，而桑小头木虱有 1 个附腺；（3）亚洲柑橘木虱的卵在交配前期为白色，在交配期和交配后期为橙黄色卵粒；而桑小头木虱在交配前期卵为白色半透明状，交配期和交配后期仅卵粒底部为黄色，卵粒其余部分仍为白色。

桑小头木虱雌成虫交配期卵粒中可观察到大囊泡，囊泡体积最大时约占卵粒体积的二分之一，交配之后随着卵粒成熟，逐渐变小。研究表明，桃小食心虫、棉铃虫、红颈常室茧蜂等的卵子发育早期出现滋养细胞，给卵母细胞提供营养，且会随着卵巢发育逐渐减小直至消失^[11-13]。桑小头木虱雌成虫卵粒中囊泡的变化趋势与上述昆虫的滋养细胞变化趋势以及出现时期极其相似，所以推测桑小头木虱雌成虫卵粒中的囊泡也起着与滋养细

胞相同的作用。在桑小头木虱雄成虫交配期和交配后期，内生生殖系统精巢、输精管和贮精囊外被黄色被膜，与蜻科的缘蜻科褐伊缘蜻以及夜蛾科斜纹夜蛾的精巢以及输精管的变化趋势相似^[20-22]；目前关于昆虫精巢外被颜色变化的研究较少，尚无文献报道其具体作用，在交配期和交配后期的含量和覆盖面不同，具体含量和成分有待进一步研究探索。但在交配期这层黄色物质最多，覆盖面也最大，交配后期发生脱落，推测这层物质可能与精子发生和成熟有关，可能起到能量提供和保护层作用。

桑小头木虱羽化初期雌雄成虫体色为黄绿色，2~3 d 后逐渐变深，背部条纹也逐渐明显^[1]，但交配期和交配后期很难只靠成虫体色的变化来区分。在田间随机采集桑小头木虱成虫样本时，根据体色和内生生殖系统解剖结果，统计解剖的成虫所处的不同交配时期，进而推测田间种群大概率所处的交配时期，可为后续监测与防控适期的确定提供参考。

桑小头木虱是我国大陆地区首次发现的外来入侵桑树害虫^[1]，实验室前期已对其生物学特征进行初步探索，从繁殖探索更有效和精准防治桑小头木虱的方法。卢芙蓉等^[23]研究发现，桑小头木虱对 595 nm 波长色卡的趋性最强，且在悬挂位置平齐或高于桑树顶端 20 cm 悬挂时诱集效果最优，雄成虫诱集效果优于雌成虫。为最大限度提高桑小头木虱不同发育时期雌虫，尤其是未产卵雌成虫的诱集率，可结合桑小头木虱内生生殖系统的变化规律，探索雄虫交配期和雌虫产卵期之前最具吸引力的颜色、虚拟波长及悬挂位置，以期通过色板诱集，在少量或不使用化学药剂的情况下，最大限度地将桑小头木虱种群控制在经济阈值之下，减少桑小头木虱对桑叶的为害，进而提高桑叶产量和质量。

生殖决定着昆虫繁衍后代的能力，为降低害虫的繁殖力，进而有效降低害虫种群数量，干扰繁殖相关基因，研制 RNAi 药物，精准降低繁殖力，是近年来害虫防治研究的重要思路 and 方向，而在繁殖相关基因干扰研究过程中，生殖系统的变化规律是最直观反映雌雄成虫生殖力的重要手段^[15-18]。本研究也是目前正在开展的桑小头木虱繁殖相关基因（FAR）RNA 干扰研究的重要组成部分，将为桑小头木虱基于 FAR 基因干扰药剂的研制奠定基础。

参考文献

- [1] 卢芙蓉, 耿涛, 武华周, 王娜玉, 汪永松, 娄德钊, 王树昌. 桑小头木虱 *Paurocephala sauteri* Enderlein 生物学特性研究[J]. 热带作物学报, 2020, 41(9): 1883-1888. LU F P, GENG T, WU H Z, WANG N Y, WANG Y S, LOU D Z, WANG S C. Biological characteristics of mulberry psyllid *Paurocephala sauteri* Enderlein (Hemiptera: Psylloidea: Psyllidae)[J]. China Journal of Tropical Crops, 2020, 41(9): 1883-1888. (in Chinese)
- [2] 李法圣. 中国木虱志[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 226-227. LI F S. Psyllidomorpha of China[M]. Beijing: Science Press, 2011: 226-227. (in Chinese)
- [3] YI C L, MAN M Y. First record of the mulberry psyllid *Anomoneura mori* Schwarz (Hemiptera: Psylloidea: Psyllidae) from Taiwan[J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2018(2): 603-608.
- [4] 杨集昆, 李法圣. 小头木虱属五新种及母生滑头木虱新属种(同翅目: 木虱科: 小头木虱亚科)[J]. 武夷科学, 1986, 6: 45-58. YANG J K, LI F S. Six new species and a new genus of Paurocephalinae (Psyllidae: Homoptera)[J]. Wuyi Science Journal, 1986, 6: 45-58. (in Chinese)
- [5] 唐毅. 西南地区木虱总科区系分类研究(半翅目: 胸喙亚目)[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007. TANG Y. Taxonomic and faunistic study on Psylloidea (Hemiptera) from SW-China[D]. Guiyang: Guizhou University, 2007. (in Chinese)
- [6] MIFSUD D, BURCKHARDT D. Taxonomy and phylogeny of the Old World jumping plant-louse genus *Paurocephala* (Insecta, Hemiptera, Psylloidea)[J]. Journal of Natural History, 2002, 36: 1887-1986.
- [7] CRAWFORD D L. The Psyllidae of borneo[J]. The Philippine Journal of Science, 1920, 17(4): 353-359.
- [8] KUMUYAMA S. A revision of the Psyllidae of Taiwan[J]. Insecta Matsumurana, 1931, 5(3): 117-133.
- [9] 肖培彬, 马义雷, 李皓, 韩群鑫. 亚洲柑橘木虱内生殖系统形态变化规律研究[J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(6): 1207-1213. XIAO P B, MA Y L, LI H, HAN Q X. Morphological changes of internal reproductive system of *Diaphorina citri* Kuwayama[J]. Journal of Environmental Entomology, 2017, 39(6): 1207-1213. (in Chinese)
- [10] 李文敬, 李新畅, 李旋, 崔娟, 徐伟, 张金平, 史树森. 大豆食心虫成虫性比对寿命和生殖力的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(3): 451-457. LI W J, LI X C, LI X, CUI J, XU W, ZHANG J P, SHI S S. Effect of sex ratio on fecundity and lifetime of *Leguminivora glycinivorella* adults[J]. Soybean Science, 2020, 39(3): 451-457. (in Chinese)
- [11] 李俊. 桃小食心虫和梨小食心虫生殖及消化系统的组织细胞学研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2016. LI J. Histo cytology study of the reproductive and digestive systems of *Carposina sasakii* and *Grapholita molesta*[D]. Taiyang: Shanxi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [12] 张万娜, 肖海军, 梁革梅, 郭予元. 棉铃虫卵巢形态与卵子发生过程观察[J]. 昆虫学报, 2013, 56(4): 358-364. ZHANG W N, XIAO H J, LIANG G M, GUO Y Y. Observation on ovarian morphology and oogenesis in cotton bollworm[J]. Acta Entomologica Sinica, 2013, 56(4): 358-364. (in Chinese)
- [13] 夏亚运. 红颈常室茧蜂卵巢发育及其生殖相关蛋白研究[D]. 海口: 海南大学, 2017. XIA Y Y. The ovarian development and reproduction-related proteins in *Peristenus spretus* Chen et van Achterbery[D]. Haikou: Hainan University, 2017. (in Chinese)
- [14] 文靓, 陈丰, 陈亚青, 周来娣, 刘玉成, 冯启理, 刘琳. 斜纹夜蛾精巢的发育和精子的发生[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 47-56. WEN L, CHEN F, CHEN Y Q, ZHOU L D, LIU Y C, FENG Q L, LIU L. The testis development and spermatogenesis in *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 47-56. (in Chinese)
- [15] 罗静. 中黑盲蝽信息素合成相关基因的筛选及功能分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. LUO J. Screening and function analysis of pheromone biosynthesis related genes in *Adelphocoris suturalis*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [16] 雷晨. 白背飞虱、灰飞虱 *Doublesex* 基因分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. LEI C. Functional analysis of *Doublesex* gene in *Sogatella furcifera* and *Laodelphax striatellus*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [17] LI D T, DAI Y T, CHEN X, WANG X Q, LI Z D, MOUSSIAN B, ZHANG C X. Ten fatty acyl-CoA reductase family genes were essential for the survival of the destructive rice pest, *Nilaparvata lugens*[J]. Pest Management Science, 2020, 76(7): 2304-2315.
- [18] 夏婷. 褐飞虱雄虫生殖基因 *NISPATA5* 和 *NIPHF7* 调控雌虫生殖及种群增长的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017. XIA T. The regulatory roles of two male-derived genes in

- female fecundity and population growth in brown planthopper *Nilaparvata lugens*[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017. (in Chinese)
- [19] BLOWERS J R, MORAN V G. Notes on the female reproductive system of the South African citrus psylla, *Trioza erytreae* (Del Guercio) (Homoptera: Psyllidae)[J]. Journal of the Entomological Society of Southern Africa, 1967, 30(1): 75-81.
- [20] 张晓红, 李敏, 张虎芳. 缘蝽总科4种雄性昆虫减数分裂期染色体形态分析(半翅目: 缘蝽总科)[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 169-177.
- ZHANG X H, LI M, ZHANG H F. Morphology of chromosome during meiotic of 4 male insects Coreoidea (Hemiptera: Coreoidea)[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 169-177. (in Chinese)
- [21] SOUZA H V, ARAKAKI R L M, DIAS L N, MURAKAMI A S, COSTA L A A, BICUDO H E M DE C, ITOYAMA M M. Cytogenetical aspects of testicular cells in economically important species of Coreidae family (Heteroptera)[J]. Cytologia, 2007, 72: 49-56.
- [22] SOUZA H V, SOUZA F B, MARUYAMA S R C, CASTANHOLE M M U, ITOYAMA M M. Meiosis, spermatogenesis and nucleolar behavior in the seminiferous tubules of *Alydidae*, *Coreidae* and *Rhopalidae* (Heteroptera) species[J]. Genetics and Molecular Research, 2009, 8(4): 1383-396.
- [23] 卢芙萍, 耿涛, 武华周, 娄德钊, 涂娜娜, 王树昌. 桑小头木虱对不同颜色的趋性[J]. 果树学报, 2021, 38(12): 2156-2165.
- LU F P, GENG T, WU H Z, LOU D Z, TU N N, WANG S C. Evaluation on color preference of adult mulberry psyllid (*Paurocephala sauteri* Enderlein)[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(12): 2156-2165. (in Chinese)